宇宙初期の銀河形成：その物理と観測フロンティア

第4回 JWST で見えた化学進化

播金 優一（京都大学 宇宙物理学教室）

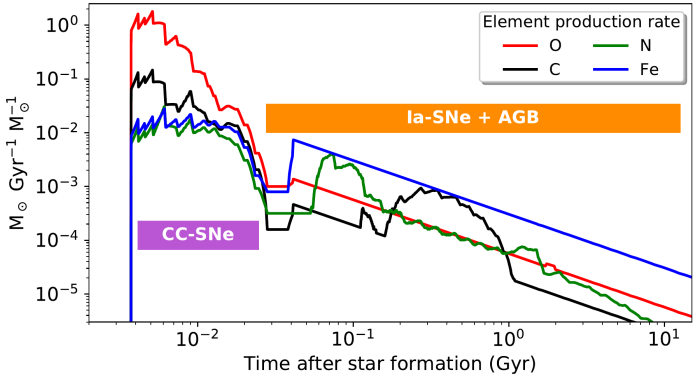
2日目 13:30–15:00

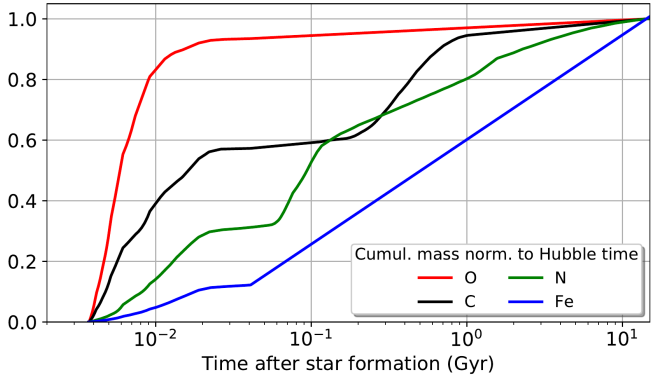


JWST First Image of SMACS0723 (NASA)

前回の復習：重元素汚染と銀河の金属量

- 星形成に伴い銀河に重元素が供給される
- 電離ガスの輝線から O/H を測る
  - direct-T_e 法、strong-line 法
- Mass-metallicity relation とその進化
- Fundamental mass-metallicity relation
- 今日：JWST観測
  - 高 z でも成り立つか？ 他の元素は？

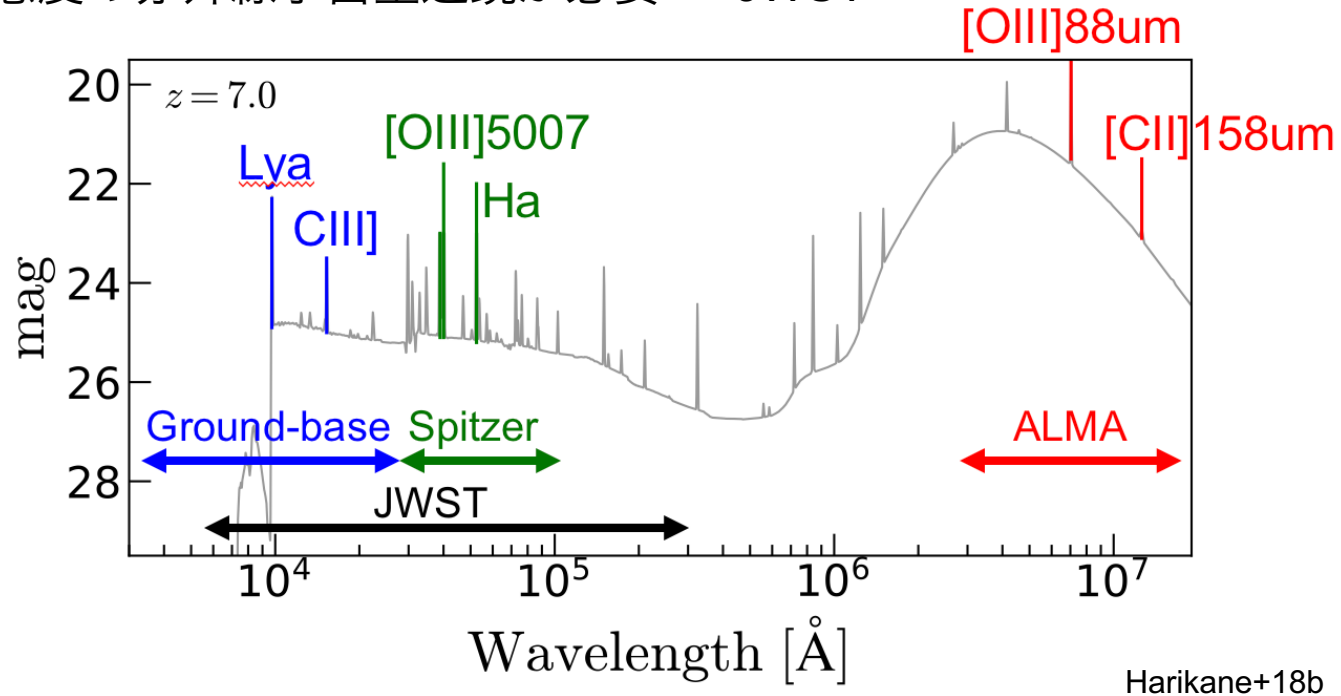




Maiolino & Mannucci 19

JWST 以前：z>4 の金属量は測れなかった

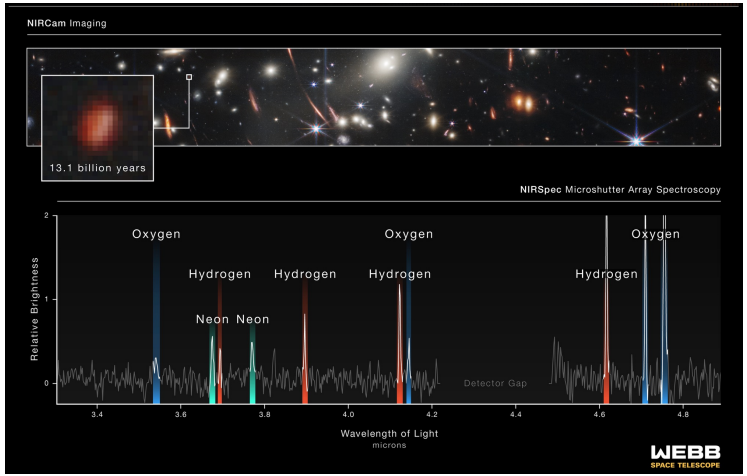
- z>4 では可視の輝線が K band（~2.2 μm）より長波長へ
  - 高感度の赤外線宇宙望遠鏡が必要 → JWST



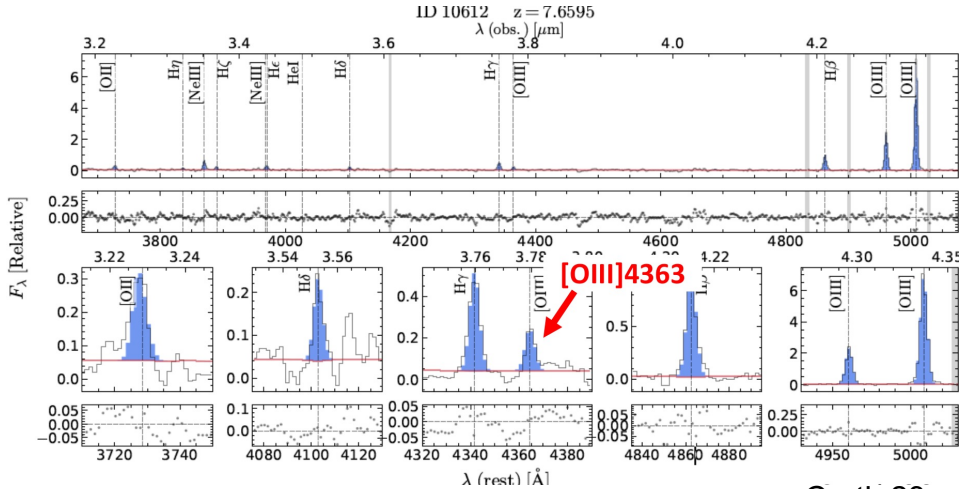
Harikane+18b

JWST のスペクトルの驚き

- JWST の近赤外分光器 NIRSpec：1–5 μm の分光で、z~10 まで可視の輝線が見える
  - 2022 年 7 月の最初の公開データで、z=8.5 の銀河の [OIII]4363 を検出
    → z~8 で direct-T_e 法が使える



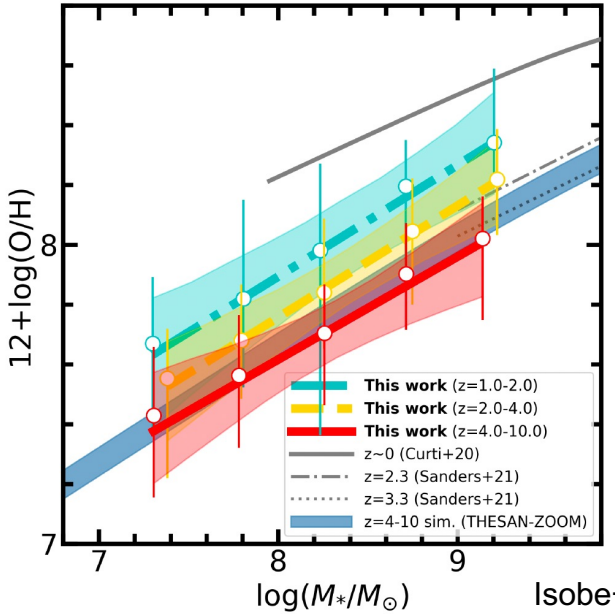
NASA/ESA/CSA/STScI



Curti+23

質量–金属量関係を z~10 まで

- z~4–10 でも星質量 M_* が大きいほど金属量が高い
- 同じ M_* で比べると、高 z ほど金属量が低い
  - bathtub model：遠方だとSFR/M*が高い → ガス流入が多い→薄まる

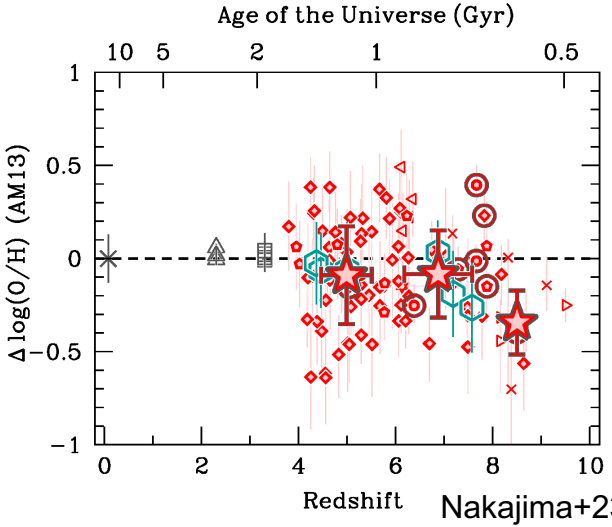


$$Z_{\rm eq} = Z_{\rm in} + \frac{y}{1 + t_{\rm dep}\,{\rm SFR}/M_* + \eta/(1-R)}$$

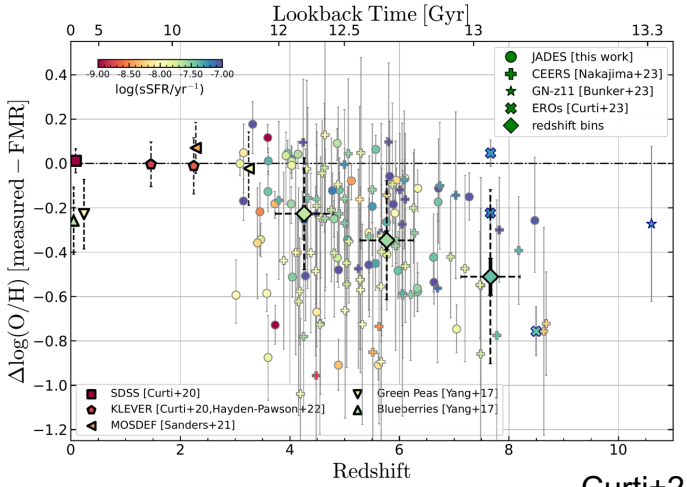
Isobe+26

z > 4 の FMR：平衡が崩れている？

- 近傍の fundamental mass-metallicity relation と比べる
  - Nakajima+23 は z>8 で、Curti+24 は z~4 から低い（z~8 で −0.5 dex）
  - どの z からずれるかは議論が続いている
- 遠方では平衡が崩れている？ (ハローの成長が速い、始原ガスの急な流入?)



Nakajima+23

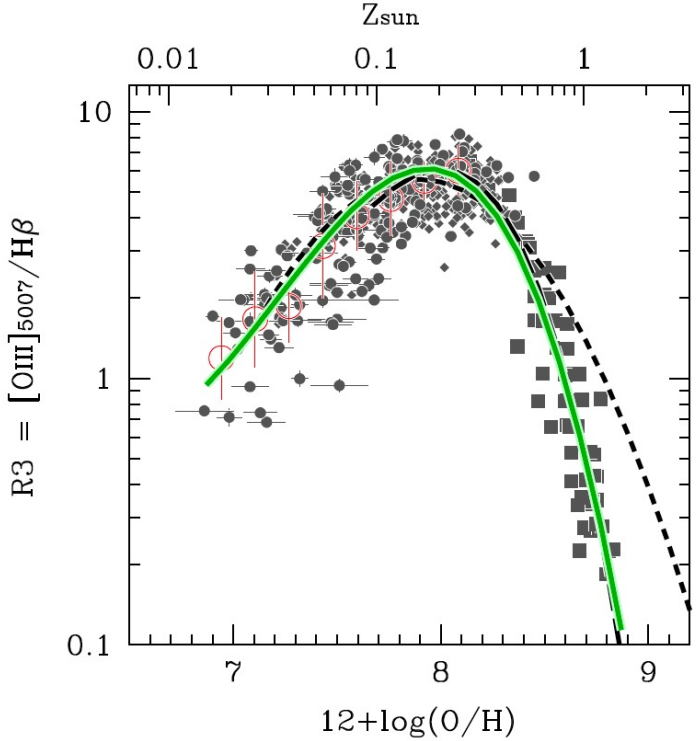


Curti+24

金属ゼロの銀河（Pop III）を探す

- 最初の星（Pop III）は金属ゼロ

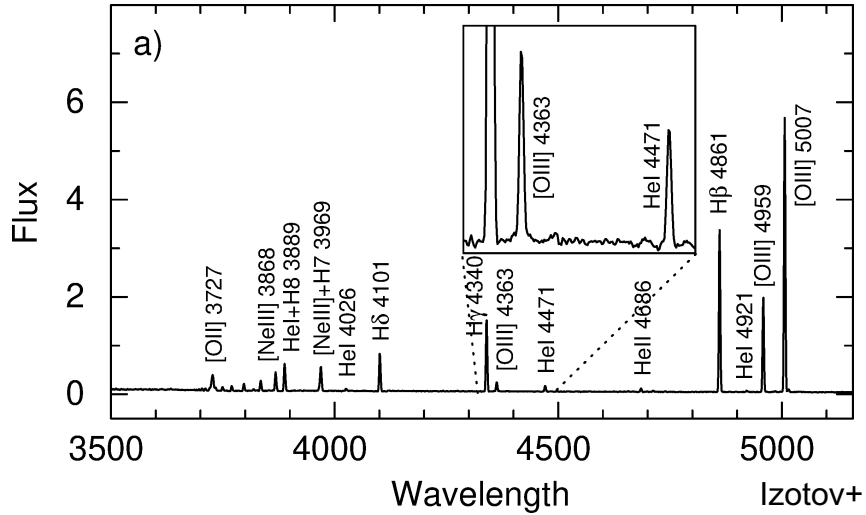
  → [OIII]/Hβ が極端に弱い銀河を探す
  - 低金属量では [OIII]/Hβ が下がる



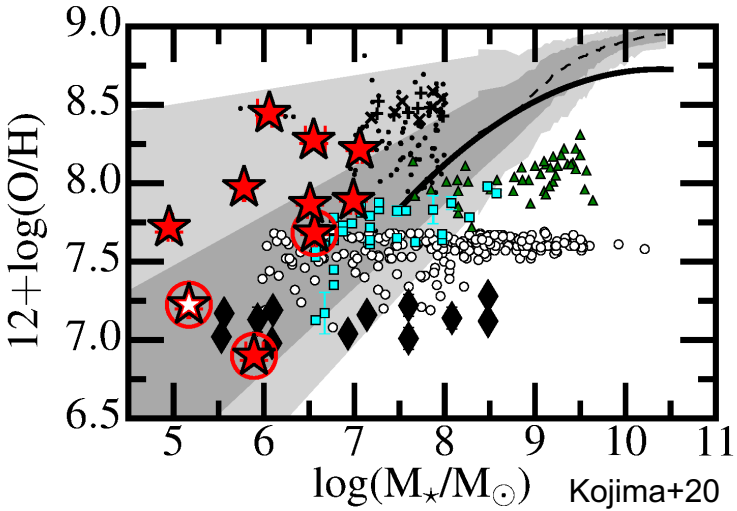
Nakajima+23

近傍の極金属欠乏銀河

- J0811+4730：$12+\log(\mathrm{O/H})=6.98$（Izotov+18）
- J1631+4426：$12+\log(\mathrm{O/H})=6.90$、太陽の 1.6%（Kojima+20）
  - Mass – metallicity relation の低質量側
- [OIII]5007 はまだ Hβ より強い



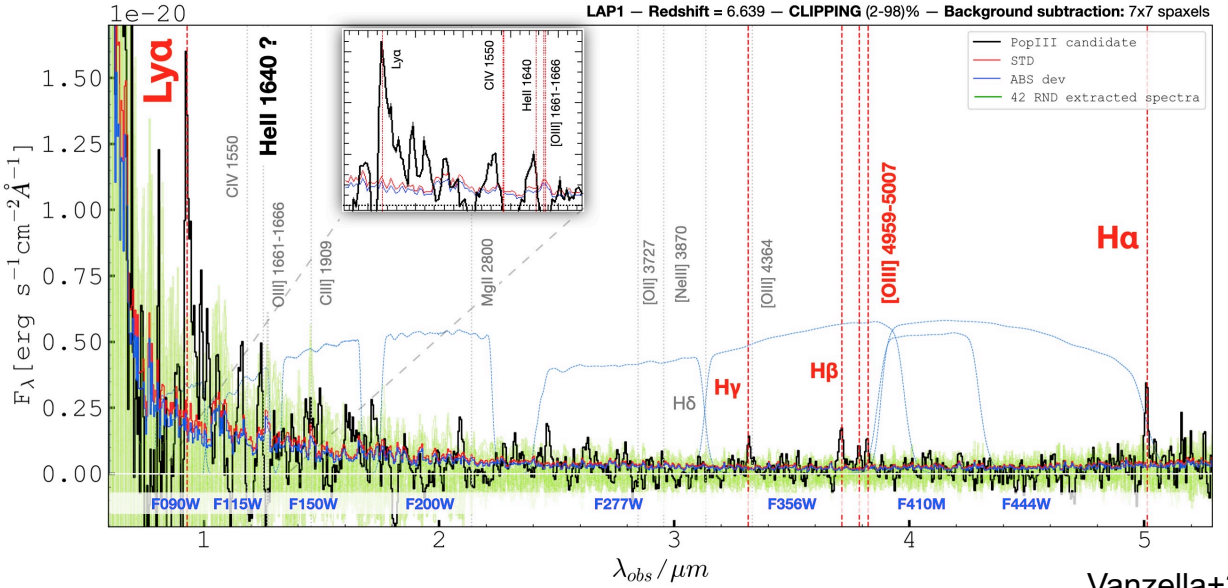
Izotov+18



Kojima+20

[OIII] が Hβ より弱い銀河

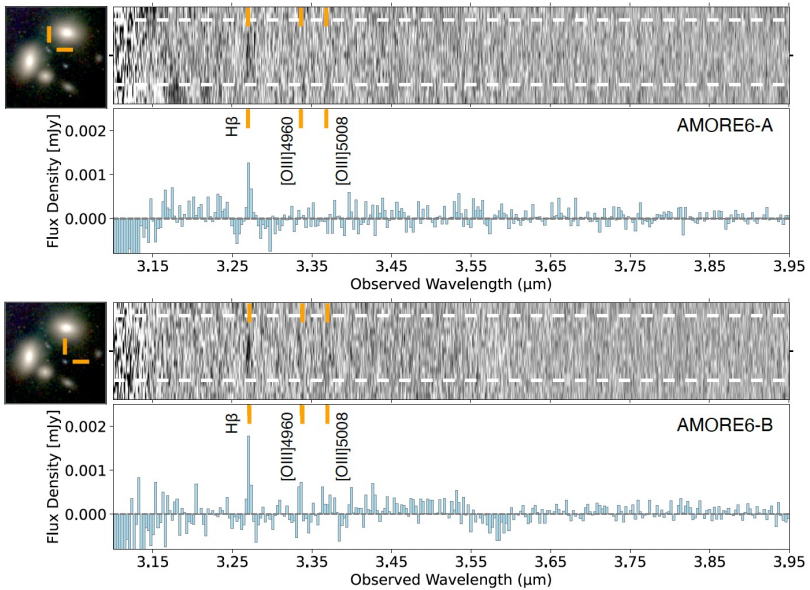
- LAP1（z = 6.64、重力レンズされた銀河）をJWST分光
  - [OIII]5007/Hβ = 0.55 で Hβ より弱い
  - $12 + \log(\mathrm{O/H}) < 6.3$（太陽の 0.4% 未満）



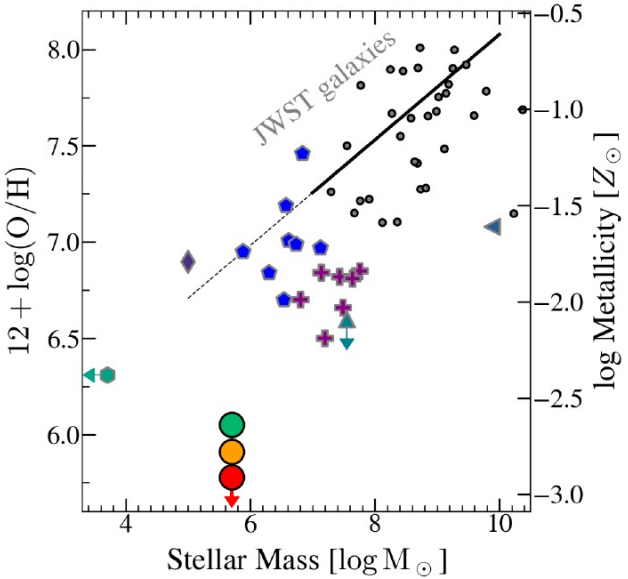
Vanzella+23

JWST で見つかった極低金属の銀河

- AMORE6（z = 5.73）：Hβ は見えるが [OIII] が検出されない
  - $12 + \log(\mathrm{O/H}) < 5.97$（$3\sigma$）：太陽の 0.2% 未満



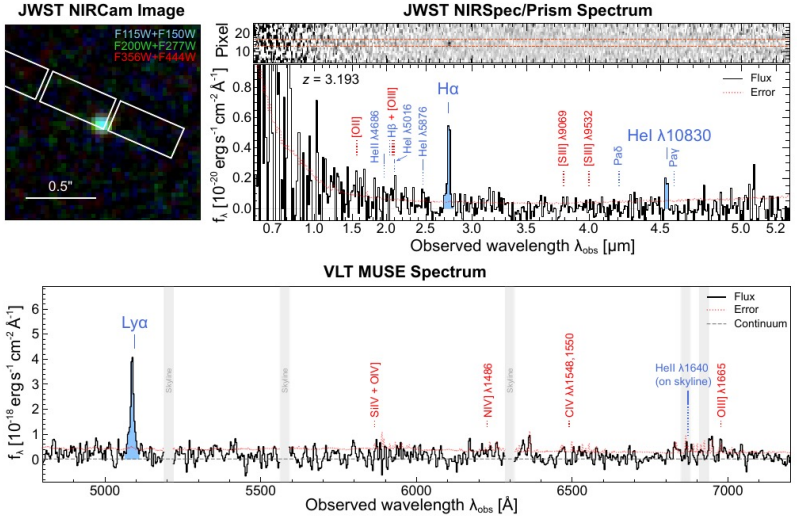
Morishita+25



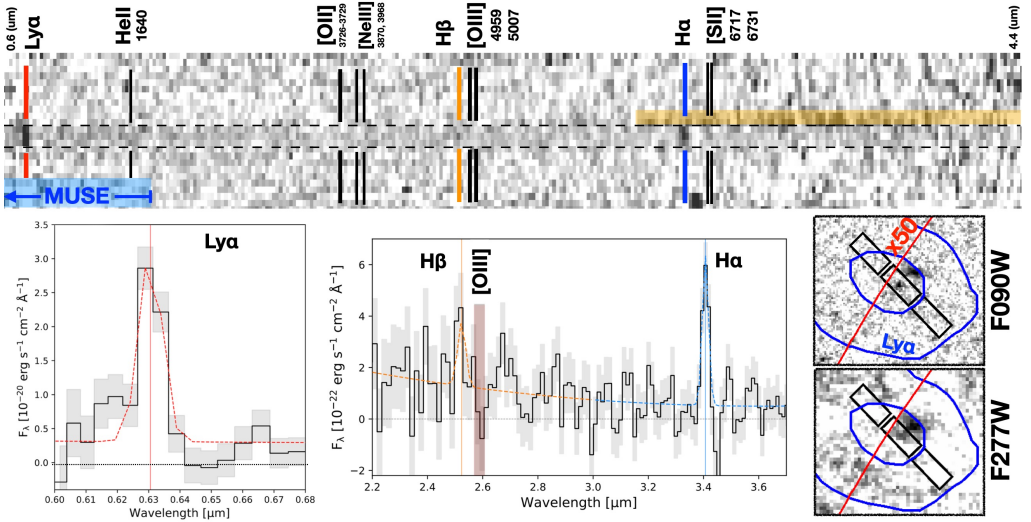
Morishita+25

ほかの例

- CR3（z = 3.19）：$12 + \log(\mathrm{O/H}) < 6.52$（Cai+25）
- LAP2（z = 4.19）：$Z < 0.006\,Z_{\odot}$（Vanzella+26）
- 金属ゼロの Pop III 銀河はまだ確認されていない



Cai+25

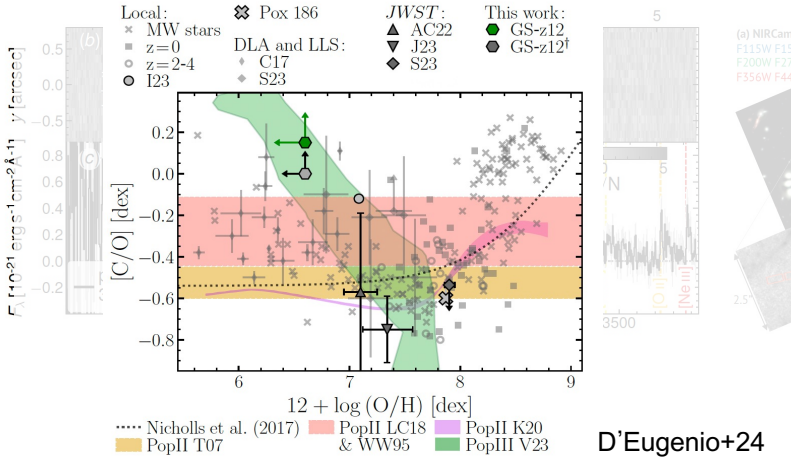


Vanzella+26

炭素から Pop III の痕跡を探す

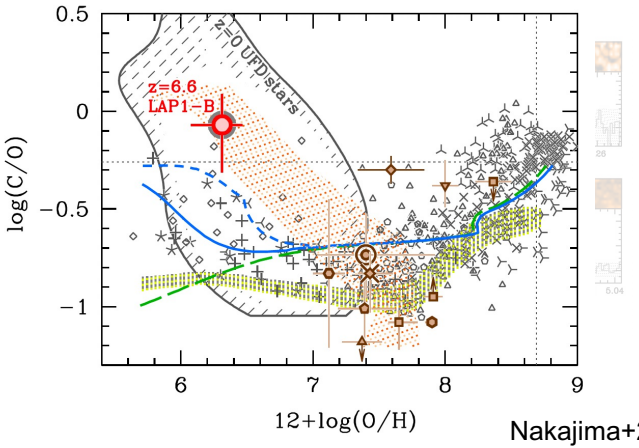
- GS-z12（z = 12.5）：強い CIII]、C/O は太陽の 1.4 倍以上
- LAP1-B（z = 6.6）：強い CIV、C/O は太陽の 1–2 倍
- 低質量の Pop III 超新星の yield は C/O が高い

GS-z12（z = 12.5）：強い CIII]



D'Eugenio+24

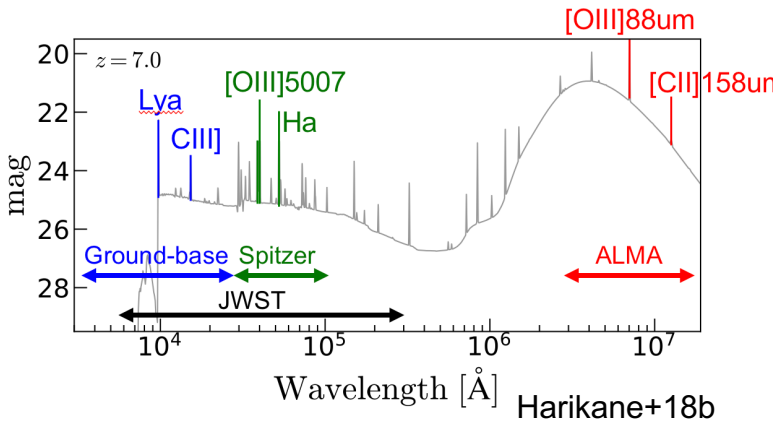
LAP1-B（z = 6.6）：強い CIV



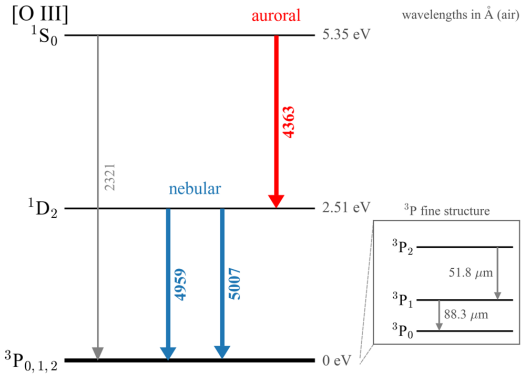
Nakajima+26

ALMA で見る遠赤外線の輝線

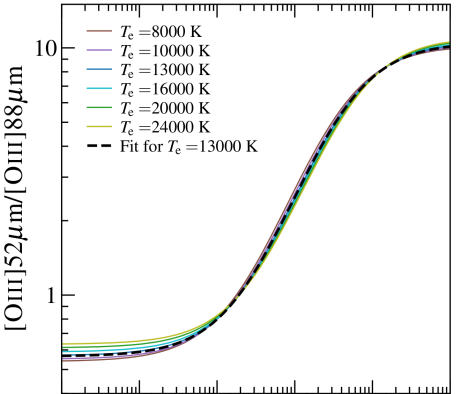
- ALMA で z>6 の [OIII]88 μm、52 μm が見える
- 一方、臨界密度が低い（88 μm：~500 cm^{-3}、52 μm：~3600 cm^{-3}）
  - 高密度のガスではすぐ衝突で脱励起される（第3回）→ 52/88 の比で n_e



Harikane+18b



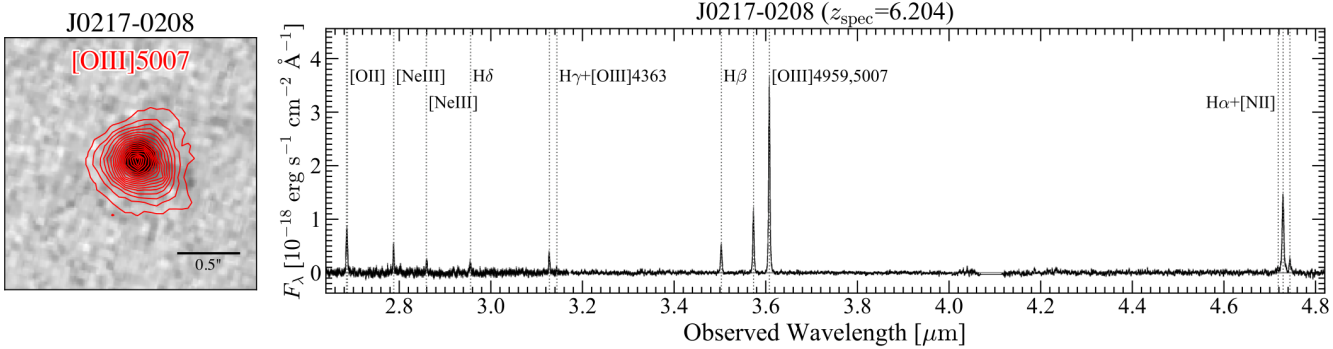
Draine 2011



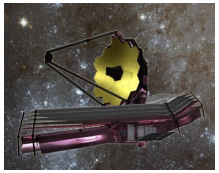
Harikane+25b

同じ銀河を JWST と ALMA で観測

- z~6–7 の明るい銀河 ：JWST NIRSpec IFU と ALMA の深い観測
  - JWST：[OII]3726,3729、[OIII]4363、5007、Balmer 線など（左）
  - ALMA：[OIII]52 μm、88 μm（右：52 μm のマップ）

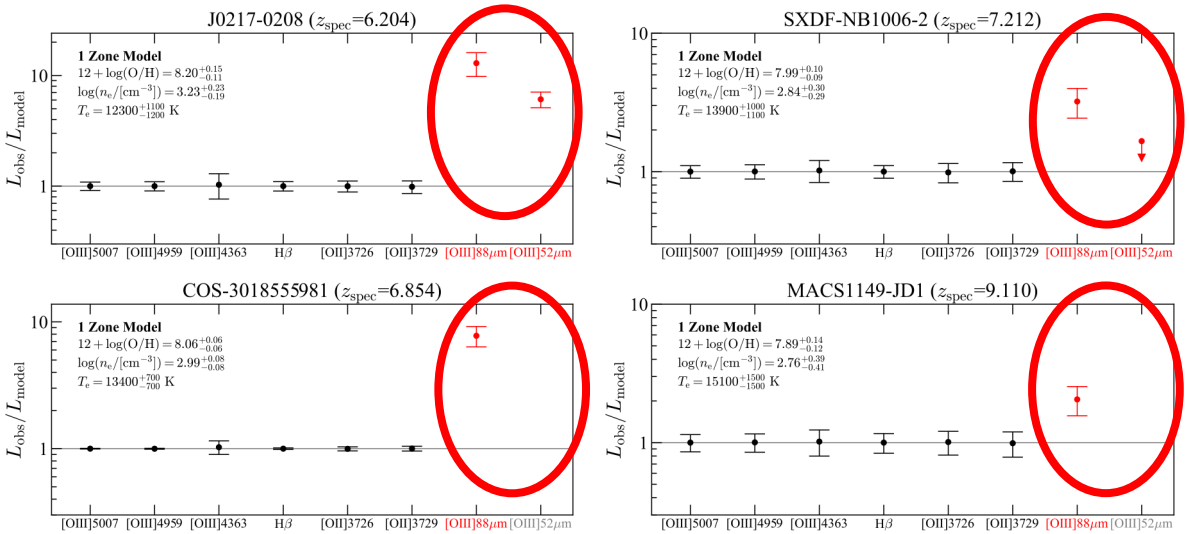


Harikane+25b

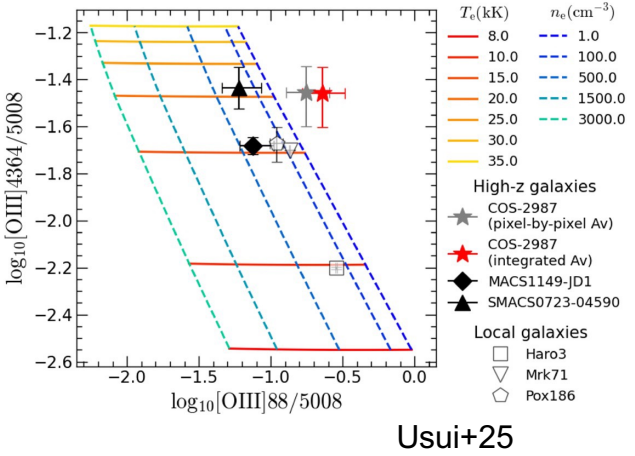

×


JWST と ALMA を合わせると？

- JWST の可視の輝線で $n_{\rm e}$、$T_{\rm e}$、O/H を決め、ALMA 遠赤外輝線を予測
- ALMA の [OIII]88、52 μm は予言より明るい（赤印）

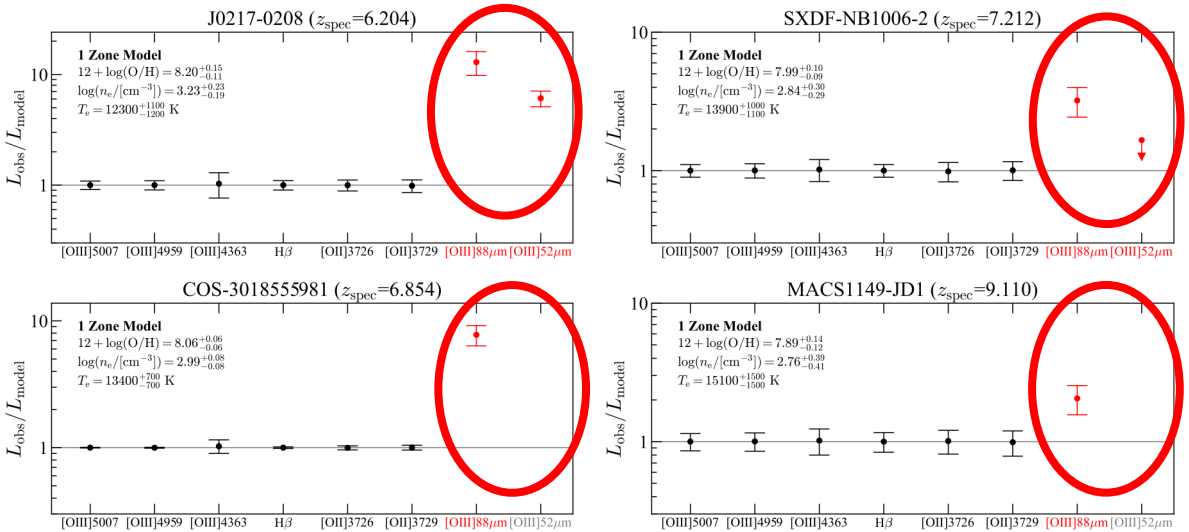


Harikane+25b

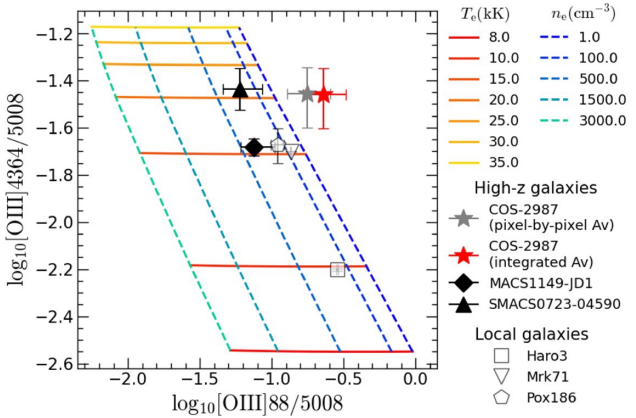


Usui+25

問題: なぜJWSTの輝線とALMAの輝線が合わない？



Harikane+25b



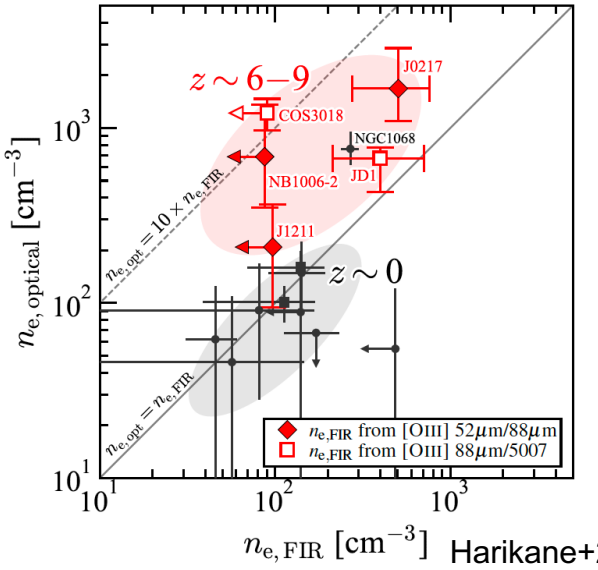
Usui+25

ヒント

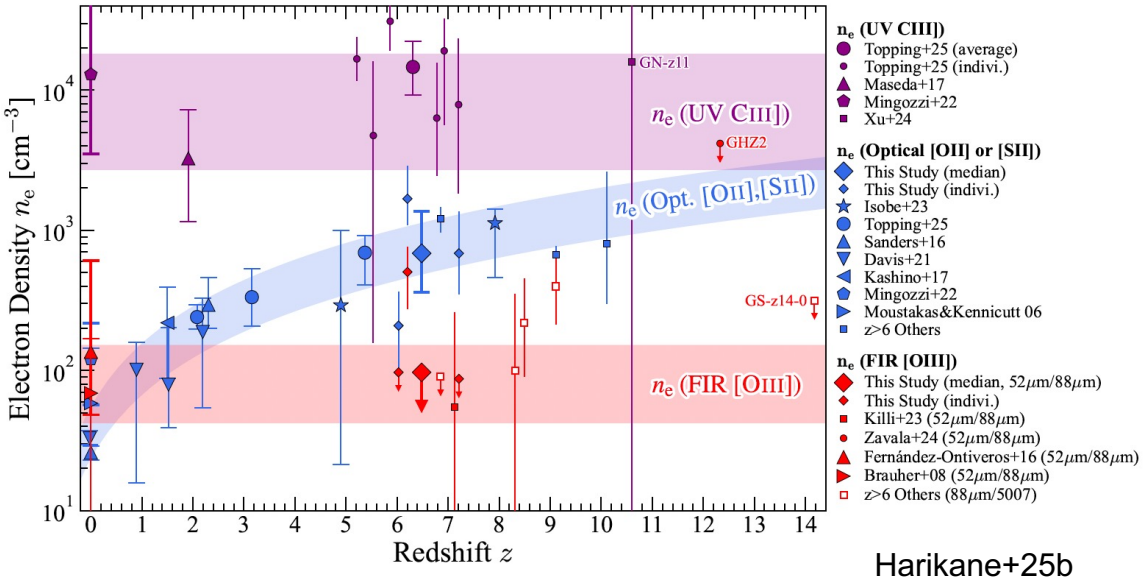
	輝線	波長	電離ポテンシャル [eV]	n_{crit} [cm^{-3}]
UV	[NIV]1483	1483 Å	47.4	1×10^{5}
	NIV]1486	1486 Å	47.4	4×10^{9}
	OIII]1661	1661 Å	35.1	4×10^{10}
	OIII]1666	1666 Å	35.1	4×10^{10}
	[CIII]1907	1907 Å	24.4	7×10^{4}
	CIII]1909	1909 Å	24.4	1×10^{9}
可視	[OII]3726	3726 Å	13.6	4×10^{3}
	[OII]3729	3729 Å	13.6	1×10^{3}
	[OIII]4363	4363 Å	35.1	2×10^{7}
	[OIII]5007	5007 Å	35.1	7×10^{5}
	[NII]6584	6584 Å	14.5	9×10^{4}
	[SII]6716	6716 Å	10.4	2×10^{3}
	[SII]6731	6731 Å	10.4	4×10^{3}
遠赤外	[OIII]52μm	52 μm	35.1	4×10^{3}
	[OIII]88μm	88 μm	35.1	5×10^{2}
	[NII]122μm	122 μm	14.5	2×10^{2}
	[NII]205μm	205 μm	14.5	4×10^{1}

なぜ合わない？電子密度が違う

- 可視の [OII] と FIR の [OIII]52/88 で n_e が違う
- 可視の n_e は高 z ほど高いが、FIR の n_e は低いまま



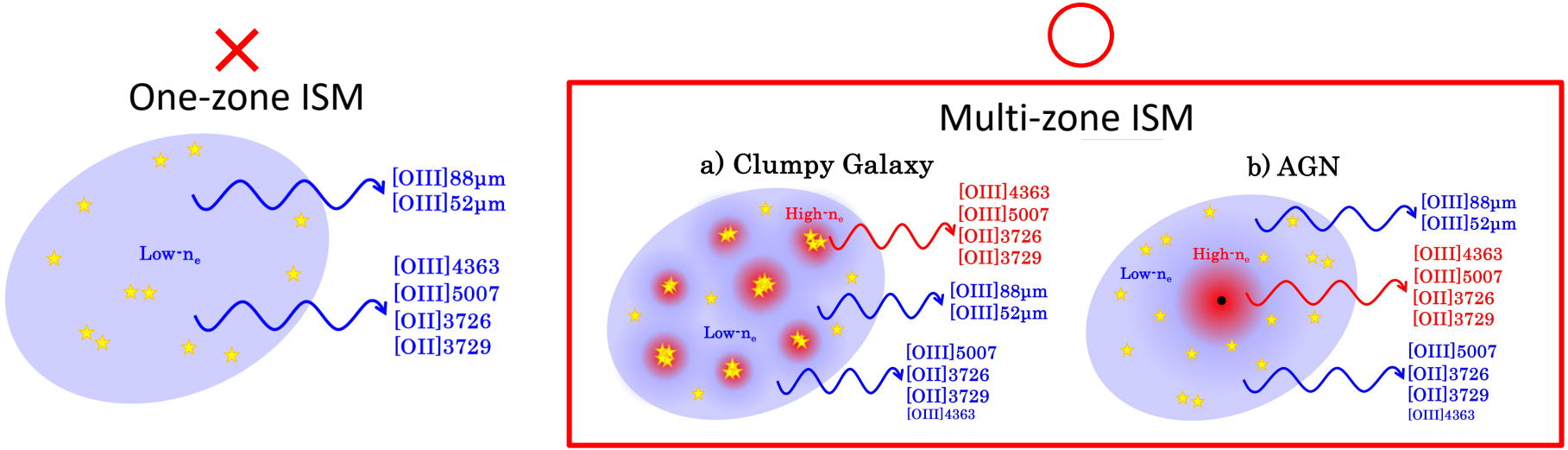
Harikane+25b



Harikane+25b

遠方銀河の星間物質 (ISM) は一様ではない（multi-zone）

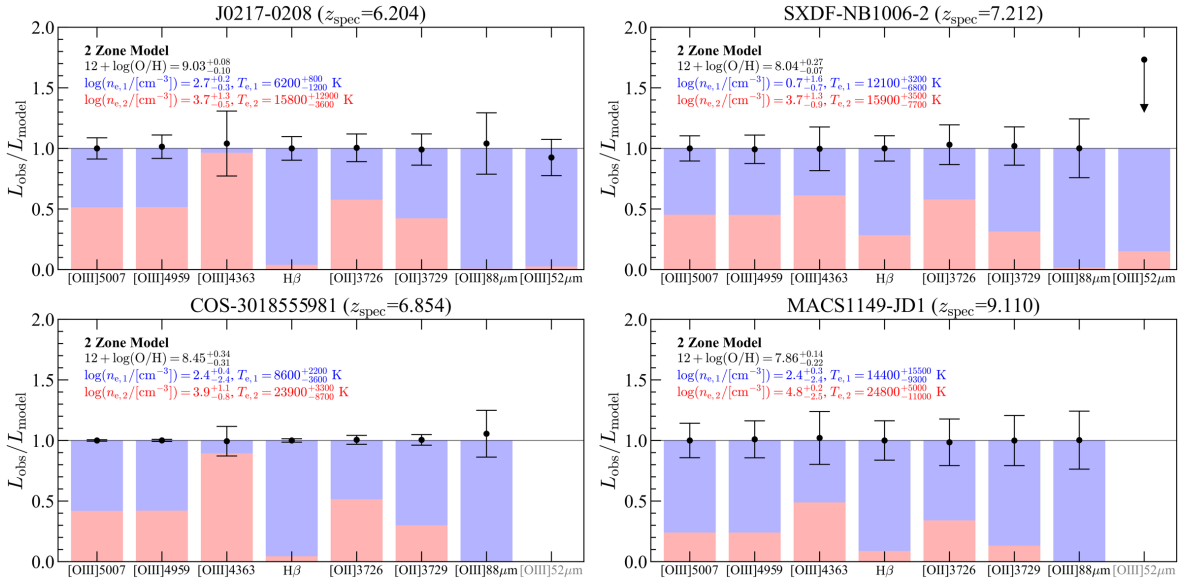
- 高密度・高温の領域：JWST の可視の輝線（[OIII]4363 など）が強い
- 低密度の領域：ALMAの遠赤外の輝線が強い
- 高密度の領域の正体：clumpy な星形成？ AGN？



Harikane+25b

2 zone のモデルで両方を再現

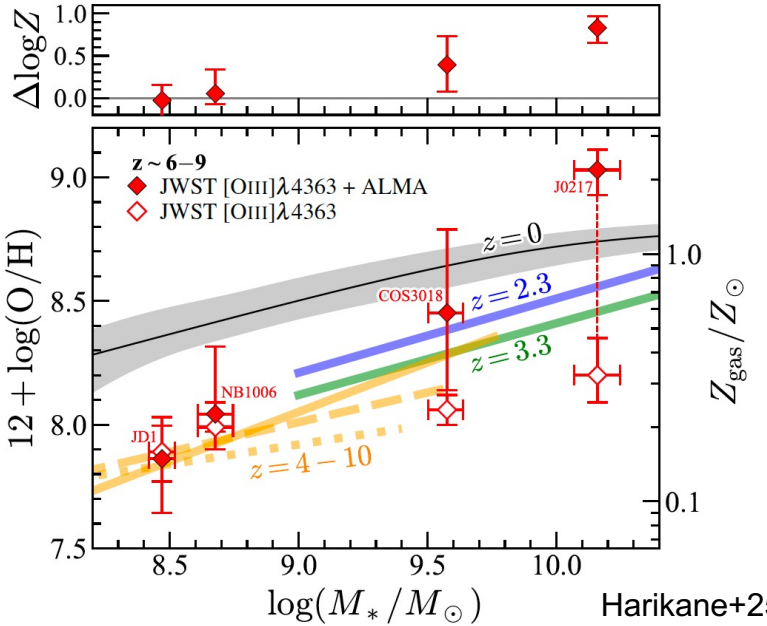
- 高密度・高温（赤）+ 低密度・低温（青）の 2 つの領域
  → JWST と ALMA の輝線を同時に再現できる



Harikane+25b

金属量の測定への影響

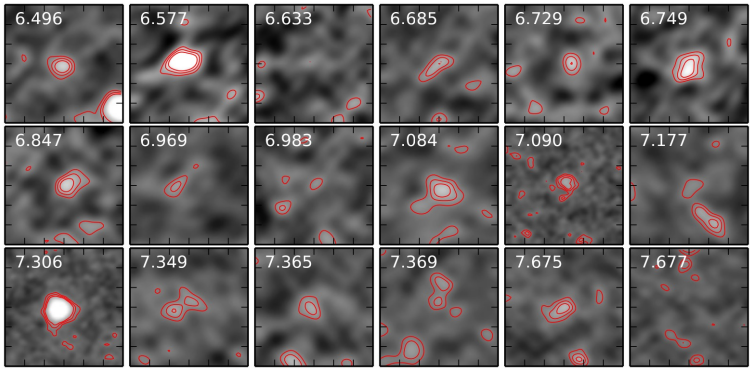
- JWST の [OIII]4363 は高密度・高温のガスに偏る
  → direct-T_e 法は電子温度を過大評価、O/H を過小評価することがある
  – ALMA で低密度のガスも測る必要がある



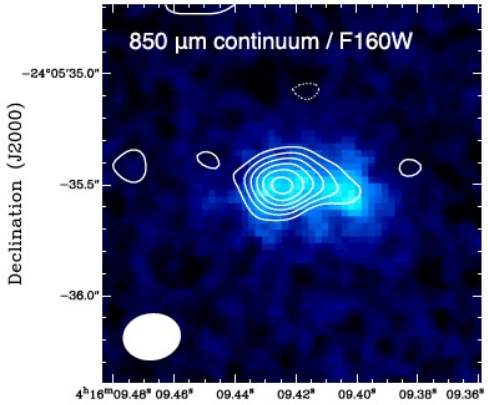
Harikane+25b

遠方の銀河のダスト

- ダスト：重元素の一部が固体の粒子になったもの
  - 作られる場所：超新星（~10 Myr）、AGB 星（~100 Myr 以降）、星間空間
- ALMA：z~7 の明るい銀河の多くでダストの連続光を検出
  - REBELS：[CII] を検出した 18 天体のうち 13 天体（Bouwens+22, Inami+22）
  - Tamura+19: z=8.3の銀河でダストを検出 (最遠方)



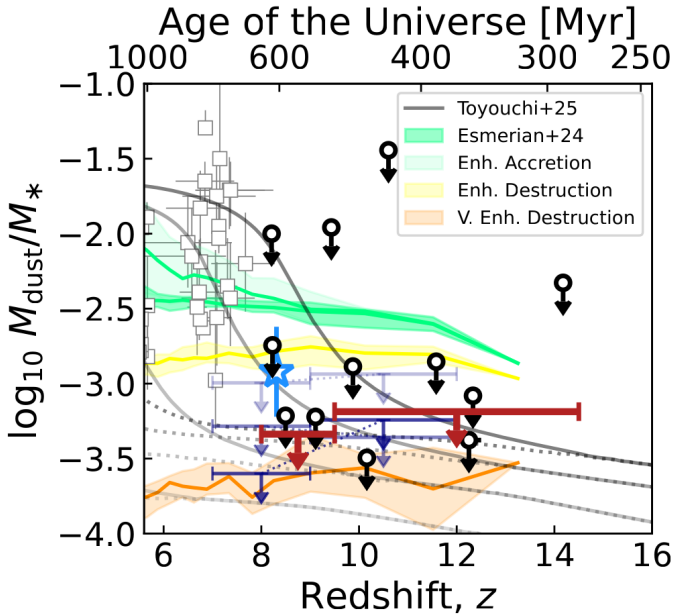
Bouwens+22



Tamura+19

z>8 ではダストが見つからない

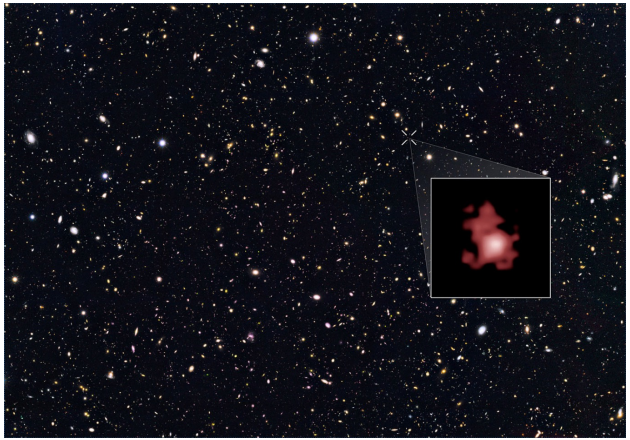
- z~7 では多くの銀河で検出 → z > 8.3 では検出なし
  - GS-z14-0 も非検出（Schouws+25）
- 原因：
  - 成長が遅い （Burgarella+25）？
  - Outflowで吹き飛ばされた（Ferrara+25）？
  - 明るい銀河の多さとも関係（第2回）



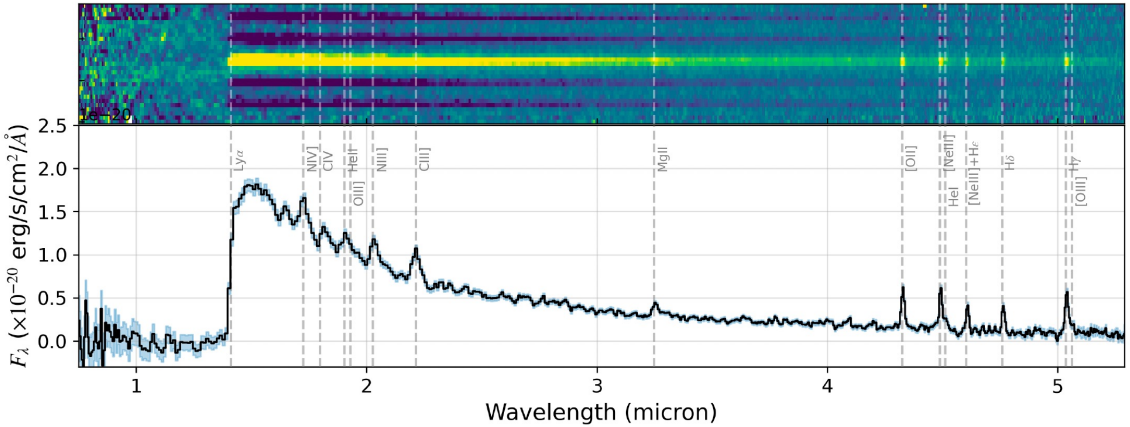
Bakx+26

酸素以外の元素：窒素の輝線が強い銀河

- z=10.60 の GN-z11：NIV]1486、NIII]1750 が強い
  - 同じような銀河が他にも見つかっている



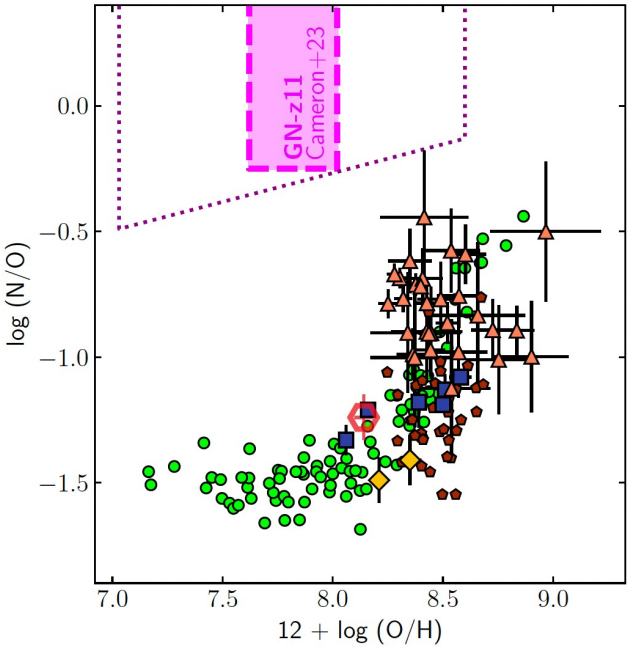
NASA, ESA, P. Oesch et al.



Bunker+23

窒素が多すぎる

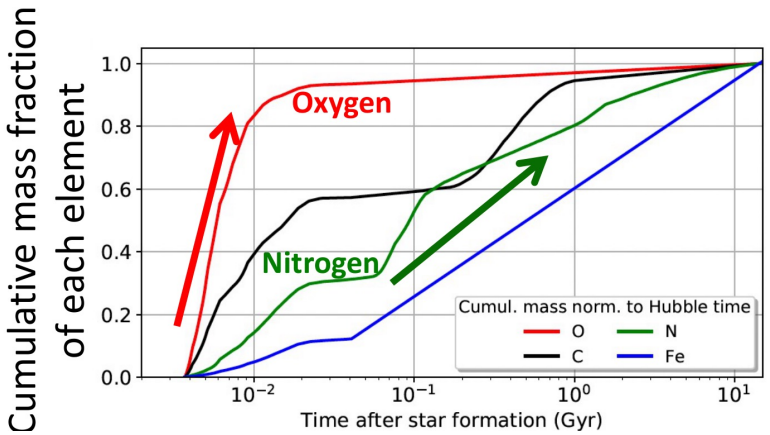
- N/O：窒素と酸素の数の比
  - NIV], NIII], [OIII] 等の輝線より測定
- GN-z11 の N/O は、同じ O/H の近傍銀河より 10 倍以上
  - 太陽の値 $\log(\mathrm{N/O}) = -0.86$ よりも高い



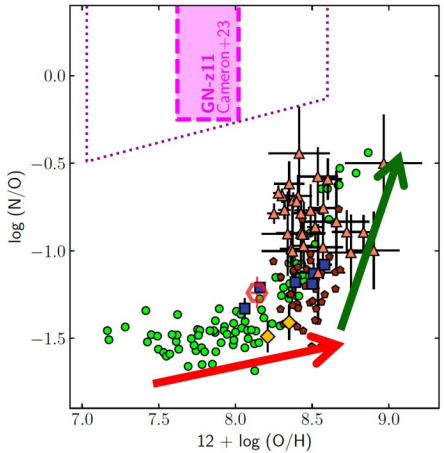
Cameron+23

なぜ驚きか？: 酸素が先、窒素は後

- O：重力崩壊型超新星で、星形成から ~10 Myr 以内に放出
- N：主に AGB 星から ~100 Myr 以降（二次的な N は O/H とともに増える）
- O/H が増えてから、遅れて N/O が増える



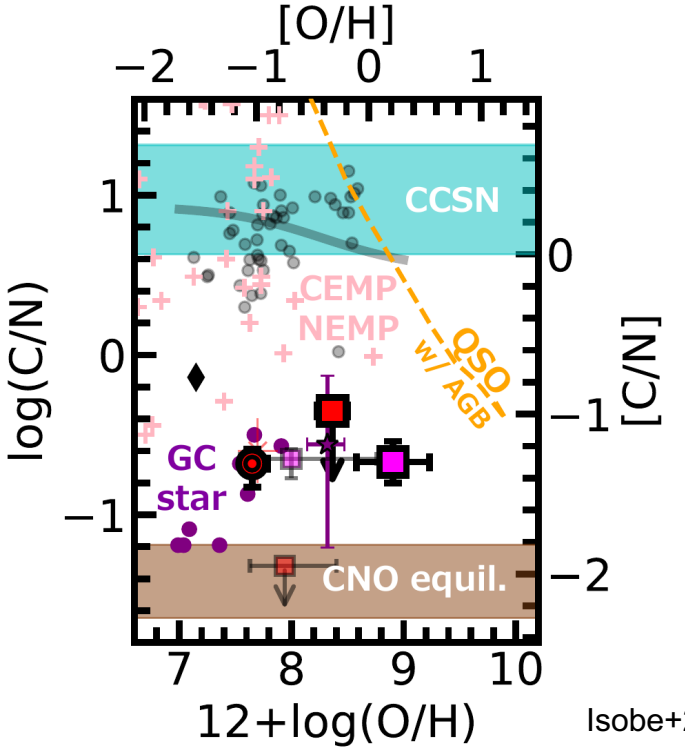
Maiolino & Mannucci 19



Cameron+23

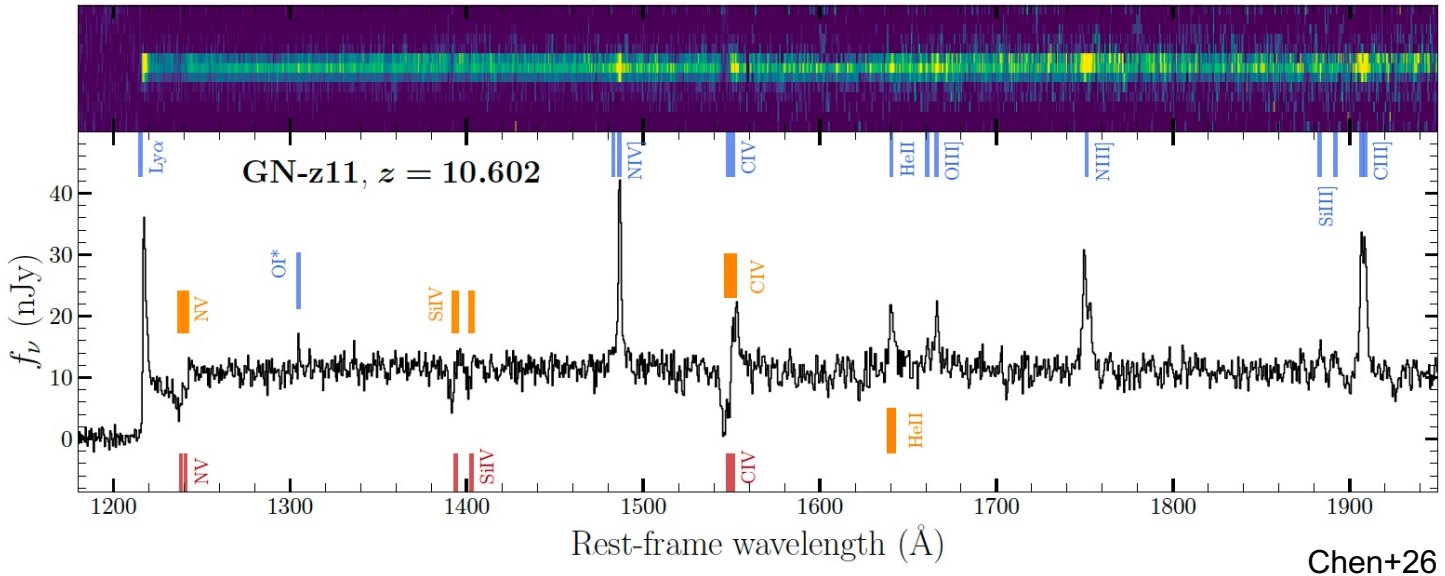
窒素過剰の原因は？

- 銀河の年齢が若い (GN-z11は~20 Myr)
  → AGB 星は間に合わない
- C/N は球状星団の星の大気に似る
  – CNO サイクルで処理されたガス
- 窒素を短時間で大量に出す天体が必要
  – Wolf-Rayet 星、非常に重い星の星風、
    tidal disruption event など



GN-z11 の深いスペクトル

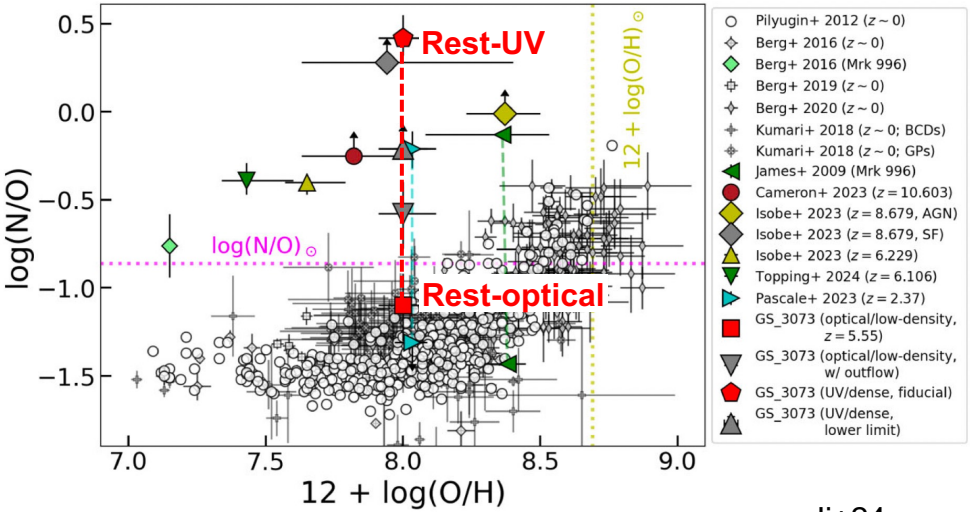
- P-Cygni 型の輪郭（NV、CIV）と広い HeII：$> 100\,M_\odot$ の非常に重い星（VMS）を含む若いモデルで再現
  - 広い輝線は Wolf-Rayet 星の星風や luminous blue variable？



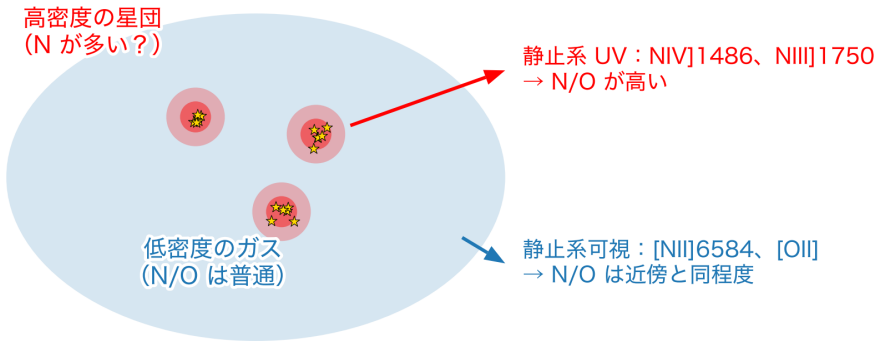
Chen+26

窒素過剰は一部のガスだけ？

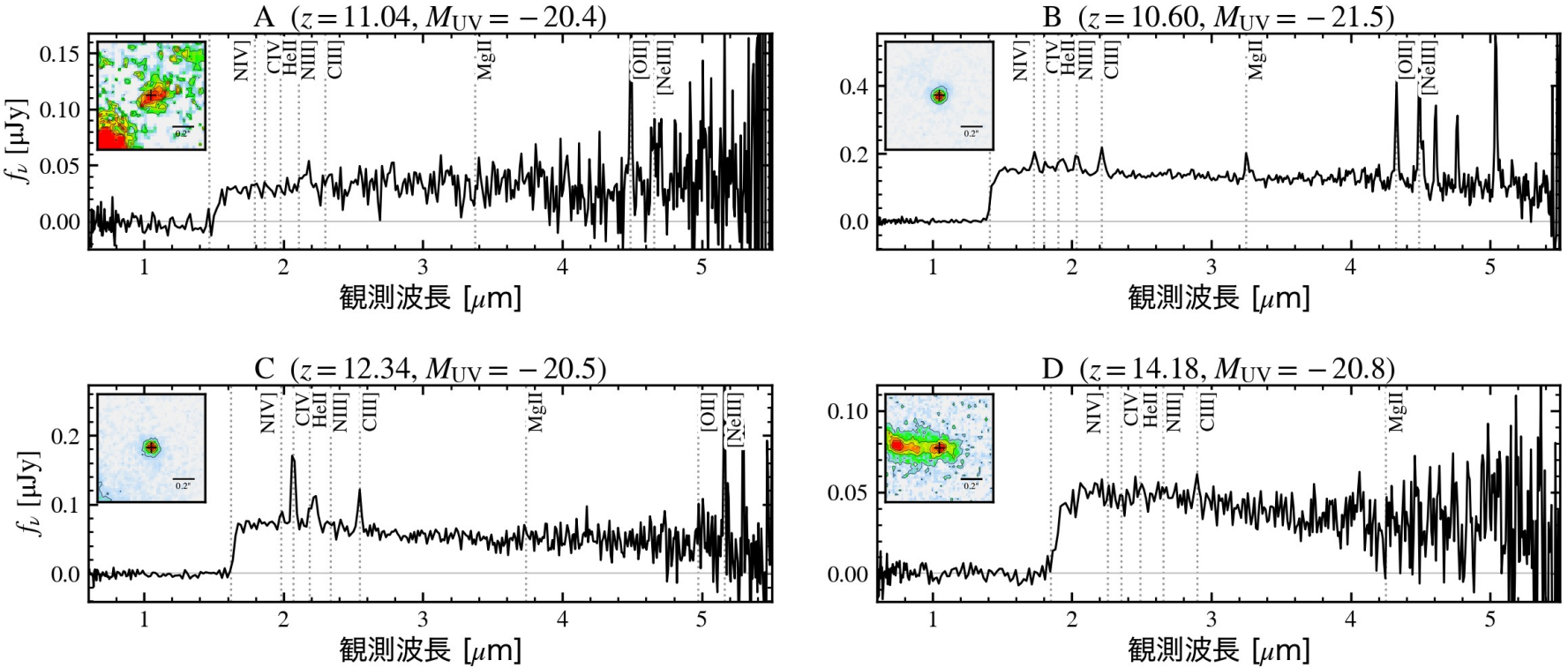
- 静止系 UV の輝線：N/O が高い
- 静止系可視の輝線：N/O は近傍の銀河と同程度
  → 高密度のガスだけで N/O が高い？（multi-zone）



Ji+24



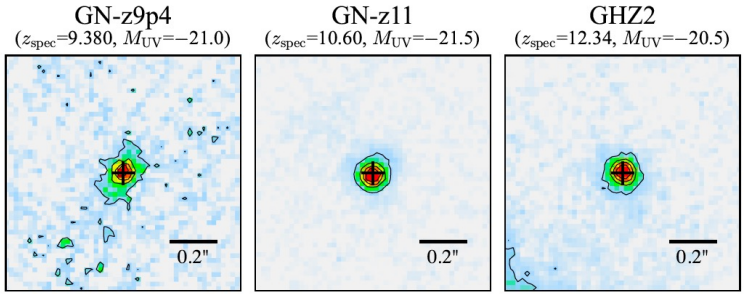
問題: どれが窒素過剰な銀河？



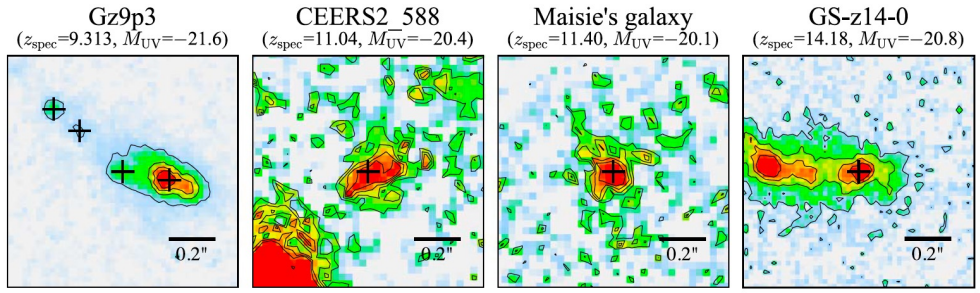
Harikane+25a、DJA

窒素の多い銀河はコンパクト

- z>10 の明るい銀河には2種類ある
  - 強い輝線（NIV] など）を示す銀河：半径 ≲100 pc とコンパクト
  - 強い輝線のない銀河：半径 ~200–300 pc に広がる



Harikane+25a



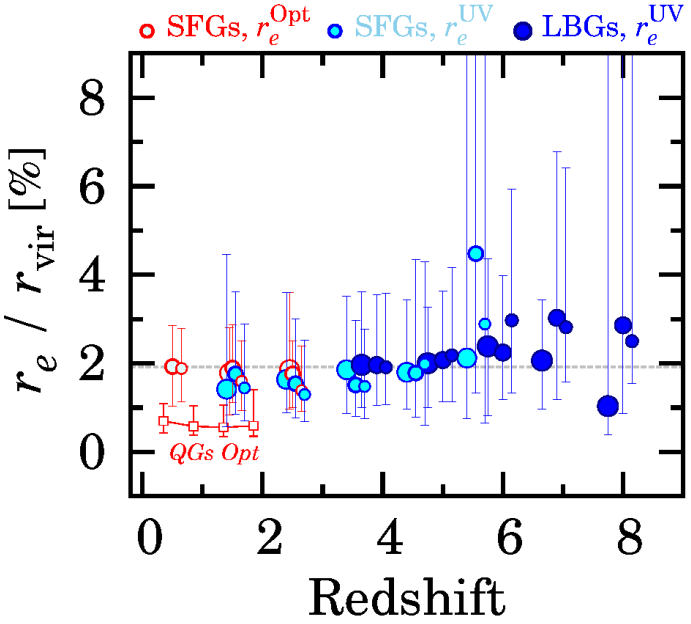
Harikane+25a

銀河のサイズはハローで決まる

- ガスはハローと同じ比角運動量で落ち込み、回転で支えられた円盤になる

$$R_{\rm d} \simeq \frac{1}{\sqrt{2}} \lambda r_{\rm vir}$$

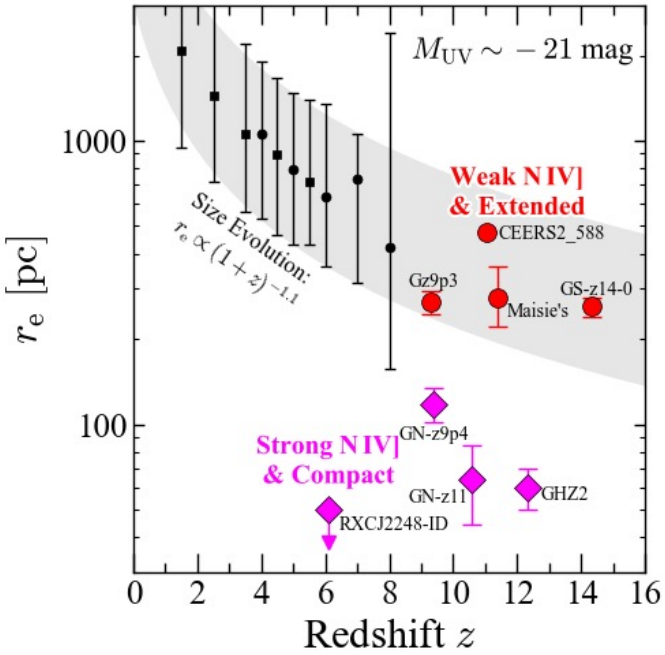
  - λ：スピンパラメータ（数%）
  - 観測：$r_{\rm e}/r_{\rm vir} \approx 2\%$ で、z~0–8 で変わらない



Shibuya+15

サイズの進化

- 同じハロー質量 $M_{\rm h}$ なら $r_{\rm vir} \propto (1+z)^{-1}$
- 典型的な銀河のサイズも同じように小さくなる（灰色）
- 窒素の多い銀河は数倍以上小さい



Harikane+25a

コンパクトな銀河で何が起きている？

- 半径が 1/3 なら Σ_{SFR} は約 10 倍、体積密度は約 30 倍

- 非常に高密度な星形成：星団の中で星が衝突・合体？
  - 超大質量星ができて窒素を放出？
  - さらに重い天体、巨大ブラックホール (BH) の種ができる？（3日目）

→ コンパクトで高密度な環境が、元素合成と巨大 BH 形成の鍵？

まとめ：第4回

- JWST：z~10 までmass-metallicity relation の進化
  - 高 z では FMR より低金属：平衡が崩れている？
- Pop III 銀河はまだ確認されていない（[OIII] の弱い銀河、C/O）
- JWST + ALMA：遠方銀河の ISM は multi-zone
  - JWST だけでは O/H を過小評価することも
- ダスト：z=8.3まで検出。z>10では検出されていない
- 窒素過剰：コンパクトな銀河で、通常の星の進化では説明しにくい

  → 高密度な環境の特別な天体（超大質量星、BH）？ → 3日目へ